

核岛主设备带极埋弧堆焊层残余应力研究

吴义党, 杨志鹏, 刘鸣宇, 张斌

(中广核工程有限公司, 广东 深圳 518124)

摘要: 介绍了核岛主设备带极埋弧堆焊工艺, 对堆焊层残余应力分布进行了有限元模拟计算, 采用小直径盲孔法测量堆焊层残余应变并计算残余应力。通过理论模拟及试验件测量相结合的研究过程, 获得堆焊层不同区域的残余应力值及其方位。为预防产品堆焊层缺陷提供了一定的理论基础, 有助于核岛主设备堆焊工艺优化及裂纹缺陷的预防。

关键词: 核岛主设备; 堆焊; 残余应力

中图分类号: TG455 文献标识码: A

Study on Residual Stress of Submerge Arc Strip Cladding Layer of Nuclear Island Main Equipment

WU Yidang, YANG Zhipeng, LIU Mingyu, ZHANG Bin

(China nuclear power engineering Co.,Ltd.,Shenzhen 518124,China)

Abstract: The submerge arc strip cladding process used on nuclear island main equipment was introduced. The cladding layer residual stress distribution was simulated by means of the finite element analysis, using small diameter blind hole method for measuring actual welding residual strain and calculating of the residual stress value. Through the combination of theoretical simulation and experimental measurement, this paper obtains the residual stress value and direction in different regions of cladding layer. Providing of a theoretical basis for the prevention of welding defect of main equipment cladding layer, which is contribute to optimize the cladding process and prevent of crack defects of nuclear island main equipment.

Key words: the nuclear island main equipment; cladding layer; residual stress

1 概述

压水堆核电站核岛主回路系统包括反应堆压力容器 (RPV)、蒸汽发生器 (SG)、主泵 (RCP)、稳压器 (PRZ) 等关键设备, 通常称其为核岛主设备。由于这些设备长期在高温、高压、辐照环境下运行, 设计要求直接接触一回路流体的容器内壁的腐蚀速率应低于 $10\text{mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{month})$ ^[1]。为此, 核岛主设备的封头、筒体和接管等部件均采用 SA508. Gr3 低合金钢大型锻件, 其内壁均需堆焊超低碳奥氏体不锈钢。国内外制造商大多采用带极埋弧堆焊工艺进行内壁不锈钢堆焊^[2]。

查阅国内外相关文献, 尚未有研究机构专门针对核岛主设备带极堆焊层残余应力进行深入研究。由于堆焊层质量关系到核岛主设备使用寿命, 研究堆焊层残余应力分布将有助于识别堆焊层薄弱区域, 为预防堆焊层下裂纹类缺陷提供一定的理论依据。

本论文结合核岛主设备带极埋弧堆焊工艺, 对堆焊层进行数值模拟及应力分析, 预测堆焊层及其附近区域残余应力分布; 采用盲孔法^[3]测量试验件堆焊层实际应力大小及分布研究, 得出堆焊层下残余应力的分布特点、明确了主应力方向及堆焊层下裂纹的发展趋势。

2 本试验所采用的带极埋弧堆焊工艺

母材选用 SA508. Gr3. Cl. 1 低合金钢锻件, 采用带极埋弧堆焊工艺 (Submerge Arc Welding, 简称 SAW), 焊材选用规格为 $60\times 0.5\text{mm}$ 的不锈钢焊带 EQ309L/EQ308L 及匹配焊剂, 工艺如表 1 所示:

表 1 不锈钢带极埋弧堆焊工艺

堆焊层	焊接材料	电流 (A)	电压 (V)	焊接速度 (mm/min)	预热 (° C)	层温 (° C)
第一层	EQ309L	740~800	26~29	130~170	121	
第二层	EQ308L	750~800	26~29	170~200	121	< 177
第三层	EQ308L	750~800	26~29	170~200	121	< 177

堆焊完成后进行焊后后热消氢处理，将工件加热到 250~293℃，保温 4 小时。完成后热之后，进行相关检验，再执行焊后消应力热处理，其工艺如表 2 所示。

表 2 焊后消应力热处理工艺^[3]

参数	要求
加热速度	≤46℃/h
保温温度	595~609℃
时间范围	24h7min
冷却速度	≤24℃/h
下降至	347℃(空冷)

3 带极埋弧堆焊层残余应力数值模拟计算

为了进一步优化堆焊工艺方案，并在发现超标缺陷时合理制定堆焊层返修方案，研究小组选取合理的边界条件，采用 ABAQUS 软件对堆焊层进行有限元分析和模拟计算，揭示出带极堆焊层残余应力分布区域及规律。具体模拟计算采用顺序耦合的方法，即先进行热分析，得到温度随时间变化的历史数据；然后将热分析得到的结果作为初始条件导入到应力计算模型中去计算焊接残余应力。

3.1 网格划分及建模

由于焊接结构（例如 RPV 筒体）尺寸较大，分析时取结构实际尺寸的 1/32 建模，如图 1 所示。共分析三层焊道，每一层厚度为 3mm，在堆焊层及其附近采用较细的网格，远离堆焊层的网格较粗。方向定义：X 方向为轴向，Y 方向为焊接方向，Z 方向为厚度方向。

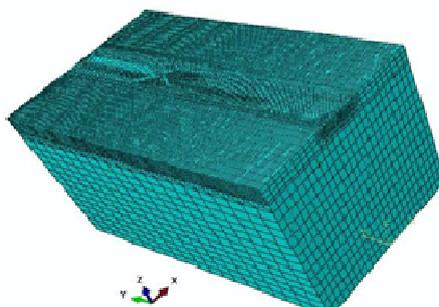


图 1 有限元模型

有限元模拟计算所用的材料性能包括高温物理性能及高温力学性能。高温物理性能有比热、热导，如图2所示，熔化潜热设为220kJ/kg、密度设为常数7.8g/mm³。高温力学性能包括屈服强度、杨氏模量，如图3所示，泊松比设为0.29。^[4]

堆焊层与母材为异种钢，二者膨胀系数存在差异，如表3所示。由于第一层较薄，约3mm，故将此层作为过渡层，其膨胀系数取母材SA508Gr.3C1.1及焊材EQ308L膨胀系数的平均值。

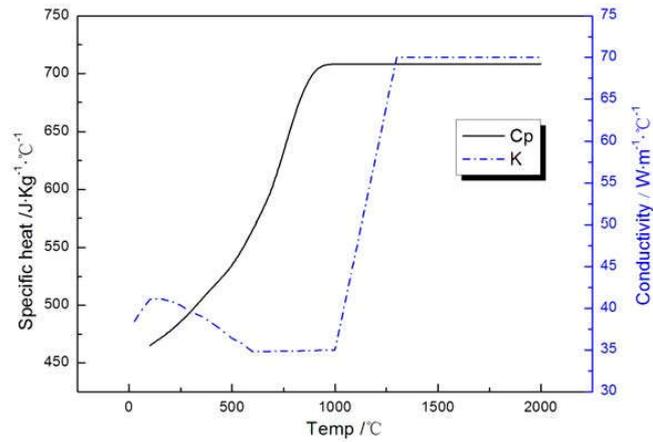


图2 SA508Gr.3 C1.1 比热和热导率

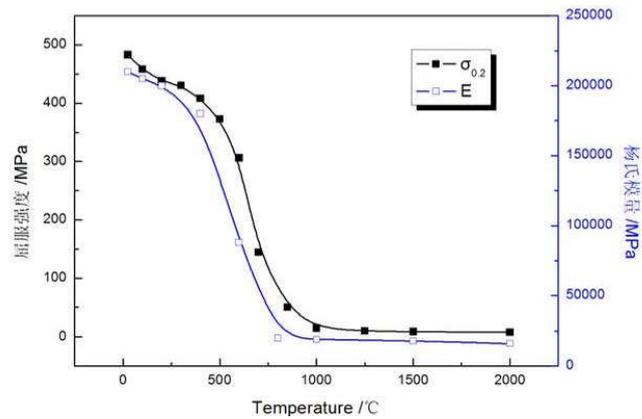


图3 SA508Gr.3 C1.1 屈服强度和杨氏模量

表3 材料膨胀系数

材料	SA508Gr.3 C1.1	EQ309L	EQ308L
膨胀系数	1.23×10^{-5}	1.48×10^{-5}	1.48×10^{-5}

图3中Y所指方向为堆焊方向，在面S1及其对立面取环向的对称约束，而在面S2及其对立面节点设置位移约束。

3.2 带极堆焊过程应力分析

实际堆焊层由多个焊道组成，考虑到工作量和计算量因素，有限元分析无法兼顾到每层焊道的堆焊过程。为了还原带极埋弧堆焊工艺，按图 4 的焊接顺序模拟焊接过程。

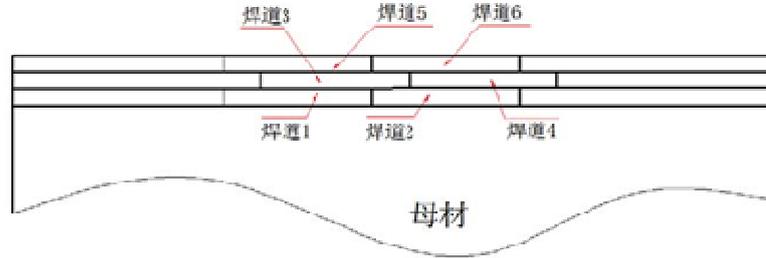
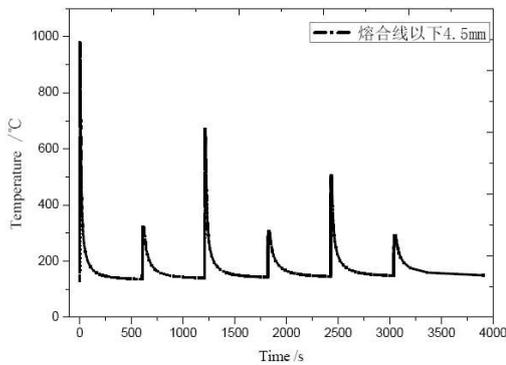
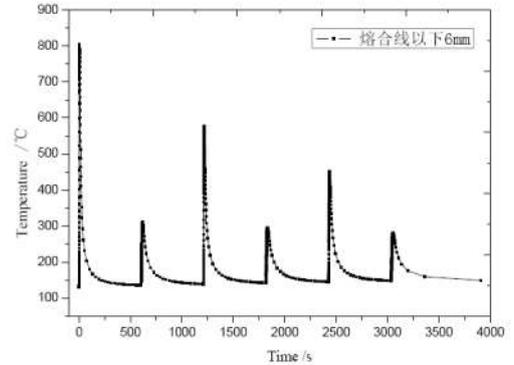


图 4 焊接顺序示意图

研究熔合线以下 4.5mm 和 6mm 位置的焊接热循环，形成的曲线如图 5 所示。



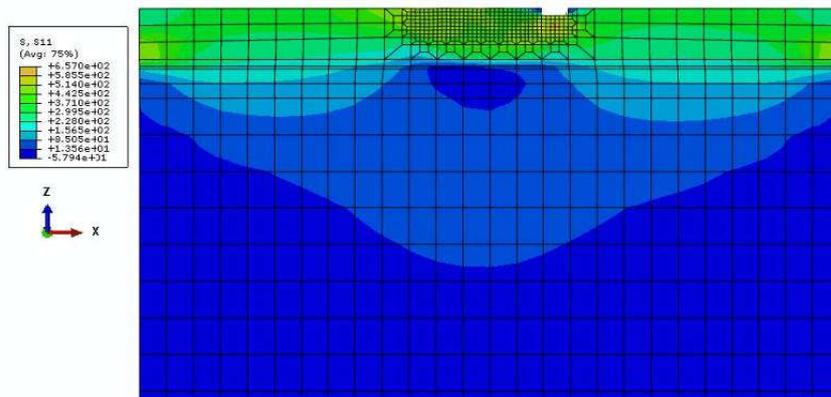
(a) 熔合线以下 4.5mm 处焊接热循环曲线



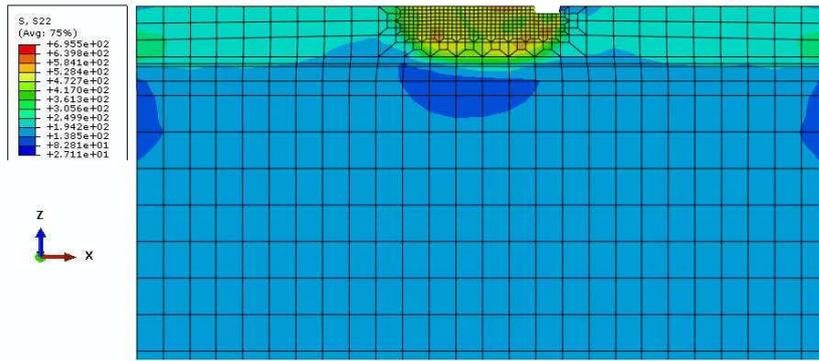
(b) 熔合线以下 6mm 处焊接热循环曲线

图 5 熔合线以下 3-6mm 焊接热循环曲线

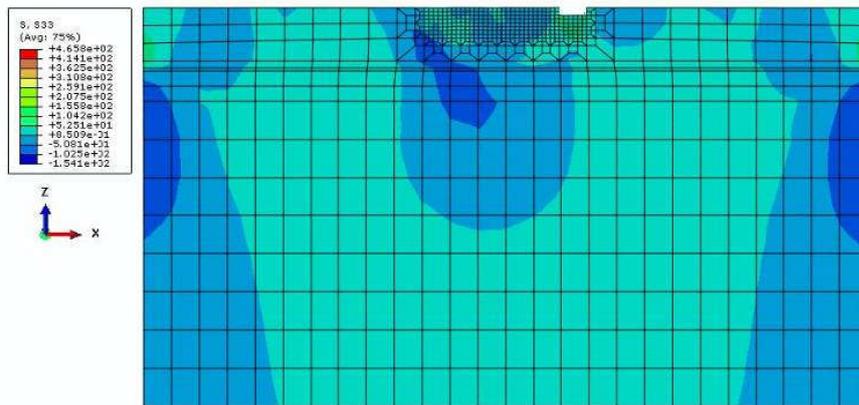
分析焊接热循环曲线可知，熔合线以下大约 5mm 以内母材金属温度超过了 AC3 相变线，将会完全奥氏体化；而 5~6mm 内母材金属温度在 AC1~AC3 之间，会发生不完全奥氏体化转变。图 6 为有限元分析得到的应力分布图。



(a) 轴向应力分布



(b) 环向应力分布图



(c) 厚度方向应力分布图

图 6 有限元分析得到的残余应力分布云图

从云图上显示的应力分布来看，堆焊层及其附近区域的焊接残余应力为拉应力，其中沿着焊接方向上的应力最大，轴向次之，沿厚度方向应力最小。

图 7 为熔合线以下 2mm 处 Misses 应力变化曲线。由分析结果可知，在焊接时，该点处于压应力状态，随着温度的慢慢冷却，压应力逐步转变为拉应力。

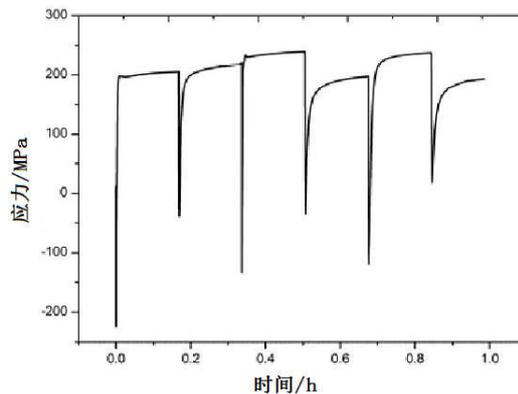
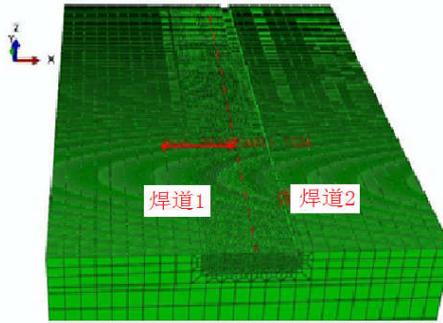
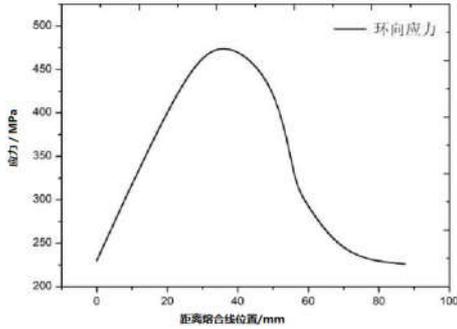


图 7 焊接过程中熔合线以下 2mm 处应力变化曲线

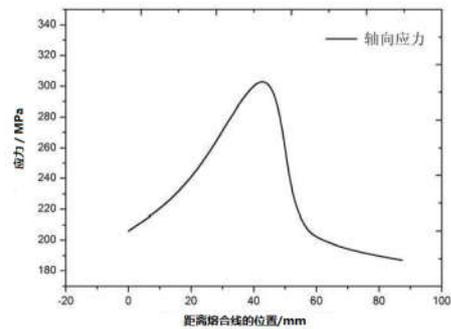
为更加直观地显示焊缝上残余应力分布，定义了以下路径：以两条焊缝交界的熔合线为中心，图 8 (a) 红色虚线所示，虚线左边为焊缝 1，右边为焊道 2，每条焊道宽 60mm，则焊缝表面沿该路径上的应力如图 8 (b)、(c) 所示。



(a) 沿堆焊层表面定义的路径



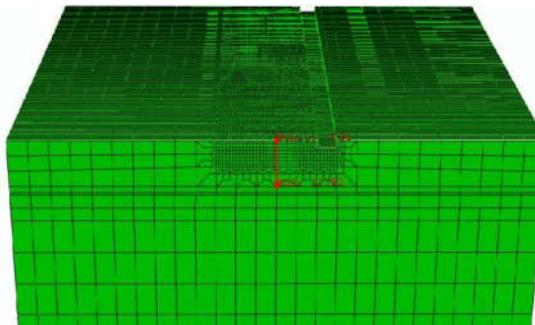
(b) 环向应力分布



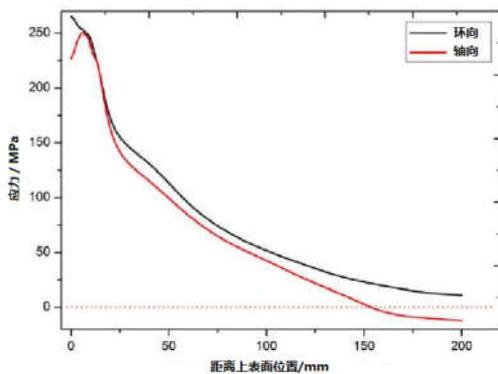
(c) 轴向应力分布

图 8 沿堆焊层表面定义路径上残余应力分布

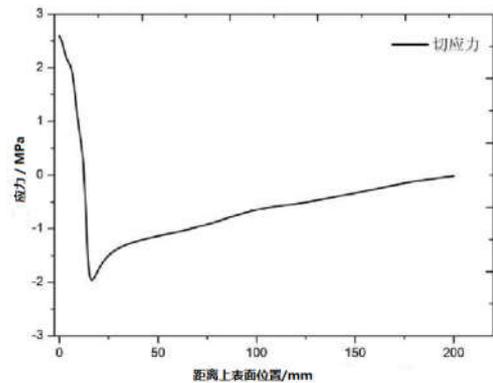
分析图 8 可知，在环向和轴向上，焊道中心的残余应力明显要大于道间搭接区上的残余应力，表面上，焊道中心沿环向的残余应力最大可达 470MPa，而道间搭接区域上的残余应力约为 230MPa。



(a) 沿厚度方向上定义的路径(表面为起点)



(b) 沿堆焊层厚度方向上应力分布



(c) 沿堆焊层厚度方向上切应力分布

图9 堆焊层厚度方向定义路径上的残余应力分布

堆焊层与基体材料晶格结构不同，在异种金属界面上氢更容易在面心立方的奥氏体中富集^[5]。堆焊后需进行消氢处理，主要目的是避免由于氢致缺陷成为冷裂纹的策源地。因此，消氢处理温度低至A3线以下，对堆焊层的残余应力分布影响不大^[6]。

堆焊层与基体材料性能相差较大，焊后及焊后消应热处理后的残余应力分布有别于常规状态，从相关文献可知，经过焊后消除热处理并不能降低堆焊层的残余应力^[7]。

由结果可以看出，沿着堆焊层厚度方向的残余应力分布规律为残余应力在堆焊层表面上最大，然后沿厚度方向逐步减小，离表面越远，残余应力越小。此外，统计得到的堆焊层表面以下6~15mm内应力分量（环向和轴向应力）、主应力大小及其与轴向的夹角如图9所示。

4 堆焊层残余应变的测量和残余应力计算

对于采用不锈钢带极堆焊工艺进行堆焊的试件采用小直径盲孔法测量焊接残余应力^[8]，具体测量方法为：利用电阻应变片，在应变片上对应的圆孔位置采用慢速钻孔仪打孔，钻孔深度略大于钻孔的直径，选用孔径为2mm的小孔，钻孔深度为2.5mm左右。小孔加工后，钻孔附近的残余应力被释放。应变片的布置如图10所示。

堆焊层残余应力测量采用盲孔法，应变仪为16通道的DH3820采集器。数据通过与应变片连接的数据线采集后，实时传输至电脑，再利用公式(1)、(2)、(3)确定出相应的主应力方向^[9]。

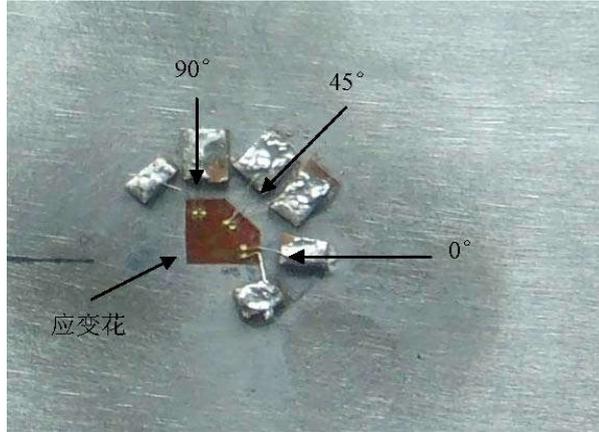


图10 测量用的三向应变片布置图

$$\sigma_{x,y} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} \pm \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (1)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) \quad (2)$$

$$\gamma = -2\beta \quad (3)$$

式中， σ_x 、 σ_y 为残余应力的主应力，单位为MPa；

ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为0°、45°、90°位置测得的释放应变；

A、B为应变释放系数，单位为 10^{-7} MPa；

$\gamma = -2\beta$ ， β 表示最大主应力方向与0度方向的夹角。

测试残余应变时，在试验件的带极堆焊层选取三个位置，分别位于堆焊层的边缘、焊道中心、焊道搭接区，每个位置粘贴了两个三向应变片，每片间隔45°。其中，应变片的0°对应筒体的环

向；90° 方向对应筒体的轴向。通过应变仪配套软件进行数据采集，打孔前对应变片进行平衡操作，之后即可打孔，过程中每 10 秒采集一次数据。钻孔完成后，继续采集约 5 分钟的数据，所得的数据为最后的释放应变。

根据 ASTM 标准，堆焊层内残余应力值可采用公式(1)计算，通过公式(2)、(3)可得出最大主应力方位。对于不锈钢材料，应变释放系数 A, B 分别选取-0.75, -1.5^[10]，测量结果及应力值如表 4.1 所示。

表 4 应变测量值及应力值

测点	ε_1	ε_2	ε_3	σ_x	σ_y	β
W1	-521	-523	-466	342.4	315.6	0.41
W2	-562	-544	-506	365.9	346.1	0.17
W3(p5)	-710	-854	-668	514.8	403.9	0.72
W4(p6)	-752	-874	-644	526.7	404.0	0.64
F3	-393	-337	-240	237.4	184.6	0.13
F4	-448	-455	-278	283.8	200.2	0.41

从表 4 中可知：堆焊层内部及堆焊层下的残余应力在环向及轴向均表现为拉应力；焊道中心的残余应力（测点 W3, W4 对应值）最大，焊道搭接区域（测点 W1, W2 对应值）残余应力次之，而堆焊层边缘（测点 F3, F4）的残余应力最小。

综上所述，采用小直径盲孔法测量残余应变并使用 ASTM 推荐公式得到的带极堆焊层残余应力的分布规律与有限元模拟计算得出的结果相吻合。

5 结论

通过有限元模拟和试验件实测堆焊层残余应力，得出以下结论：

- (1) 堆焊层内部及堆焊层下应力在环向及轴向均表现为拉应力。
- (2) 焊道中心的残余应力最大，焊道搭接区域上残余应力次之，堆焊层边缘的残余应力最小。
- (3) 有限元分析结果表明：焊道表面上的残余应力最大，沿厚度方向逐步减小。
- (4) 根据主应力方向，若堆焊层内或堆焊层下母材产生裂纹，裂纹走向与筒体环向成 60~80°（平均角度为 68.2°），或者说与筒体轴向成 10~30°（平均角度为 21.8°）。带极堆焊后的消应力热处理并不能大幅度降低堆焊层中的残余应力。当锻件母材中存在带有尖锐角度的夹杂物时，容易引起应力集中，当夹杂物的位置在堆焊层表面 5mm 以内且其走向与筒体轴向成 10~30° 时，在堆焊层残余应力的作用下，夹杂物的应力集中位置可能成为起裂点，并存在产生堆焊层下裂纹的风险。

参考文献：

- [1] 曾乐. 现代焊接技术手册[M]. 上海：上海科学技术出版社，1993:1448-1449.
- [2] 雷中黎, 吴义党, 乔木 等. 核电厂核岛主设备制造焊接质量及其控制[M]. 北京：中国电力出版社，2014:99-100.
- [3] RCC M Section IV WELDINDG (2000+2002) [M] Afcen 2000.

- [4] 方向威, 机械工程材料性能数据手册[M], 北京: 机械工业出版社, 1995:43-44.
- [5] 吴义党, 杨志鹏, 刘鸣宇 等. 反应堆压力容器下底圆 J 型坡口隔离层预热问题分析及处理[J] 热加工工艺, 2012(19): 192-195.
- [6] 宋天民. 焊接残余应力的产生与消除[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004:200-201.
- [7] 陈丙森, 史耀武. 焊接手册(第二版), 第 3 册, 焊接结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001:130-131.
- [8] 田锡唐. 焊接结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989:68-69.
- [9] ASTM E837-81 用钻孔应变测量决定残余应力的标准方法(S)
- [10] 袁发荣 伍尚礼. 残余应力测试与计算[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1987, 35-71.

作者简介: 吴义党(1967-),男, 江西永修人,高级工程师,目前从事核电站设备监造技术支持造管理工作;电话:18566289657;Email:wuyidang@cgnc.com.cn